

回复电压微分谱线特性的变压器绝缘老化研究*

林智勇¹, 张达敏¹, 黄国泰², 薛尚青³, 李君⁴

(1. 厦门理工学院电气工程与自动化学院 高电压技术福建省重点实验室 厦门 361024; 2. 福建省电力物资有限公司 福州 350003; 3. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院 福州 350012; 4. 国网安阳供电公司 安阳 455000)

摘要:针对油纸绝缘变压器老化会对其等效电路产生影响,通过分析回复电压谱线与等效电路参数的函数关系,提出回复电压微分解谱法确定等效电路极化支路数,解决了长期以来变压器等效电路极化支路数难以确定的问题,为准确诊断变压器绝缘状态奠定重要基础。通过实例验证表明:利用回复电压微分解谱法能够准确判定等效电路的极化支路数,能更准确地反映变压器绝缘老化状况,且变压器绝缘老化越严重,其回复电压微分谱线子谱线个数和等效电路的极化支路数越多。

关键词: 回复电压; 变压器; 等效电路; 绝缘

中图分类号: TH183 TM411 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Insulation aging of transformer based on recovery voltage differential spectrum line characteristic

Lin Zhiyong¹, Zhang Damin¹, Huang Guotai², Xue Shangqing³, Li Jun⁴

(1. High-voltage Key Laboratory of Fujian Province, College of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. Fujian Electric Power supplies Limited, Fuzhou 350003, China; 3. State Grid Fujian Economic Research Institute, Fuzhou 350012, China; 4. State Grid Anyang Power Supply Company, Anyang 455000, China)

Abstract: To avoid the impact of oil-paper insulation transformers' aging on its equivalent circuit, the recovery voltage differential spectrum solution method is proposed to determine the number of equivalent circuit's polarization branches by analyzing the functional relation between the recovery voltage spectrum line and the parameters of the equivalent circuit. The proposed method solves the long-time knotty problem in determining the number of polarized branches of the equivalent circuit, laying a solid foundation for diagnosing the insulation state of the transformer accurately. Case studies show that the number of polarization branches of the equivalent circuit can be determined accurately and the insulation aging condition of the transformer is reflected more accurately by using the recovery voltage differential analysis method. Moreover, the number of the differential spectrum lines and polarization branches becomes larger when the transformer insulation aging becomes worse.

Keywords: recovery voltage; transformer; equivalent circuit; insulation

0 引言

大型油浸式变压器是电力系统重要的组成部分,并处于电网关键的环节^[1-2],一旦它发生故障而退出运行,将造成大面积停电事故,严重时会引起电力系统解列,影响国民生活水平和国民经济发展,造成不可估量的经济损失^[3-4]。所以它的安全稳定运行不仅关系着整个电网

的供电稳定性与可靠性,还关系着地区国民经济的可持续发展。统计数据表明,油纸绝缘变压器故障大部分都是由于其内部绝缘老化引起的^[5],因此,研究一种准确诊断油纸绝缘变压器绝缘状态的方法对提前预防变压器绝缘故障,提高电网稳定运行的可靠性具有重要的工程应用价值^[6]。

目前国内外学者对油纸绝缘变压器的老化诊断进行了大量的研究,时域和频域介电谱法因具有无损性、可靠

性高等特点而越来越受到研究人员的青睐^[7]。Yu X. ZH. 等人^[8]中利用扩展德拜模型来分析变压器油纸绝缘系统,通过分析模型参数的变化来研究油纸绝缘老化情况; Xu S. ZH. 等人^[9]利用回复电压极化谱数据并结合最小二乘法对扩展德拜模型参数辨识进行研究。Samarasinghe W 等人^[10]探究了变压器绝缘老化状态与其介电性能之间的相关性,利用微带环形谐振器在高频(1 GHz以上)条件下进行介电常数测量,通过研究介电常数与绝缘纸拉伸指数的相关性以及损耗正切值与绝缘纸水分含量的相关性,来评估变压器绝缘老化状态。文献^[11]研究了水分对变压器绝缘纸寿命的影响,提出了温度影响情况下,变压器内部水分含量与绝缘纸剩余寿命的内在函数关系,为变压器固体绝缘老化诊断提供新的方法;文献^[12]对绝缘纸纤维素分子的稳定性进行研究,利用两个不同的纤维素模型(水;水、双氰胺、三聚氰胺和聚丙烯酰胺),以水的扩散系数和纤维素链的距离为模型变量,研究胺对纤维素热稳定性的影响,指出双氰胺、三聚氰胺和聚丙烯酰胺能够显著提高绝缘纸纤维素的热稳定性。

国外学者主要通过实验方法研究绝缘介质的老化物理参数和化学参数来评估变压器油纸绝缘老化状态,比较少涉及时域介电谱法中测量曲线微观信息的研究,而国内学者虽然对回复电压谱线与绝缘老化状态进行了研究,但忽略了回复电压谱线与绝缘老化的内在联系以及回复电压谱线与等效电路结构的内在关联,直接假定了等效电路中极化支路数来研究变压器绝缘老化状态,由于绝缘老化对内部绝缘介质的极化有着重要影响,随着老化加剧,老化产物增多,反映不同绝缘介质极化特性的等效电路极化支路也应随之增多,所以研究回复电压谱线与等效电路结构的内在关系具有重要意义。

针对以上问题,本文首先分析了变压器等效电路与回复电压的关系,从中推导出回复电压公式与等效电路极化支路数的内在关系,然后提出等效电路极化支路数的判定准则,最后探讨等效电路极化支路数与绝缘老化之间的关系,从而为准确诊断变压器绝缘老化奠定重要基础。

1 油纸绝缘变压器等效电路

目前,国内外学者常用扩展德拜模型来等效油纸绝缘变压器的等效电路,其结构如图 1 所示。其含有 N 个表征不同弛豫响应的 RC (极化电容 C_{pi} 、极化电阻 R_{pi}) 串联支路组成的极化等效电路和绝缘电阻 R_g 、几何电容 C_g 组成的几何等效电路两部分。

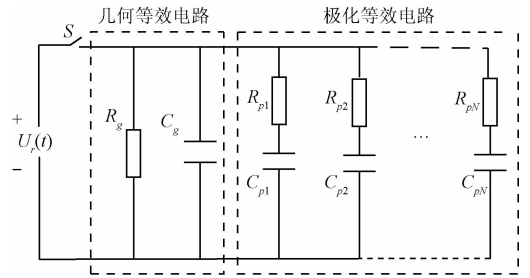


图 1 油纸绝缘变压器的等效电路
Fig. 1 The equivalent circuit of transformer oil paper insulation

在图 1 所示的油纸绝缘变压器等效电路中,当回复电压单次测量的充电、短路阶段完成后,等效电路中各个极化电容中都有剩余电荷,而这些剩余电荷在极化电容两端所形成的电压可等效为独立的电压源。根据叠加定理,等效电路在松弛阶段产生的回复电压值可以等效为各个极化电容所形成的独立电压源作用效果的叠加。现以第一条极化支路上 C_{p1} 的残余电压作用为例,分析其单独作用下的回复电压值。

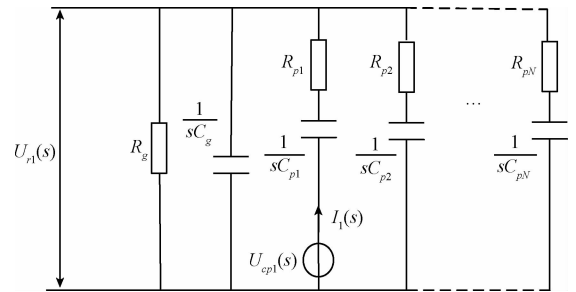


图 2 极化支路 1 单独作用下的运算电路
Fig. 2 Operating circuit under 1 separate action of polarization branch

根据运算电路理论,可得式(1)和(2)。

$$U_{r1}(s) = U_{cp1}(s) - \left(R_{p1} + \frac{1}{sC_{p1}} \right) I_1(s) \quad (1)$$

$$\frac{U_{r1}(s)}{R_g} + sU_{r1}(s)C_g + \frac{U_{r1}(s)}{R_{p2} + \frac{1}{sC_{p2}}} + \frac{U_{r1}(s)}{R_{p3} + \frac{1}{sC_{p3}}} + \dots + \frac{U_{r1}(s)}{R_{pN} + \frac{1}{sC_{pN}}} = I_1(s) \quad (2)$$

联立式(1)和(2),可得 C_{p1} 上残余电压与回复电压之间的转移函数为:

$$\frac{U_{cp1}(s)}{U_{r1}(s)} = \frac{(sC_{p1}R_{p1} + 1) \cdot \left[sC_gR_g + 1 + \sum_{k=1}^N \frac{sC_{pk}R_g}{sC_{pk}R_{pk} + 1} \right]}{sC_{p1}R_g} \quad (3)$$

由此可推导出 C_{pi} 上的回复电压与残余电压的转移函数通式:

$$\frac{U_{ri}(s)}{U_{cpi}(s)} = \frac{sC_{pi}R_g}{(sC_{pi}R_{pi} + 1) \cdot \left[sC_gR_g + 1 + \sum_{k=1}^N \frac{sC_{pk}R_g}{sC_{pk}R_{pk} + 1} \right]} \quad (4)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, N$ 。对式(4)进行拉式反变换可求出回复电压 U_{ri} 与 C_{pi} 上残余电压之间的时域关系式, 设 $(p_1, p_2, \dots, p_{N+1})$ 为转移函数的极点, $(z_{1,i}, z_{2,i}, \dots, z_{N,i})$ 为转移函数的零点, 则式(4)可变化为:

$$\frac{U_{ri}(s)}{U_{cpi}(s)} = \frac{H_{N,i}(s - z_{N,i})(s - z_{N-1,i}) \dots (s - z_{1,i})}{L_{N+1}(s - p_{N+1})(s - p_N) \dots (s - p_1)} \quad (5)$$

对式(5)进行拉普拉斯逆变换, 可以获得极化电容 C_{pi} 对应的时域回复电压 $U_{ri}(t, t_c, t_d)$ 表达式为:

$$U_{ri}(t, t_c, t_d) = (B_{1,i}e^{p_1 t} + B_{2,i}e^{p_2 t} + \dots + B_{N+1,i}e^{p_{N+1} t}) \cdot U_{cpi}(t_c, t_d) \quad (6)$$

$$B_{j,i} = \frac{H_{N,i} \prod_{k=1}^N (p_j - z_{k,i})}{L_{N+1} p_j \prod_{l \neq j} (p_j - p_l)} \quad (7)$$

根据叠加定理, 可得回复电压 $U_r(t)$ 的公式为:

$$U_r(t, t_c, t_d) = \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=1}^N B_{i,j} U_{cpi}(t_c, t_d) e^{p_i t} = \sum_{i=1}^{N+1} A(i) e^{p_i t} \quad (8)$$

式中: $A(i) = \sum_{j=1}^N B_{i,j} U_{cpi}(t_c, t_d)$, $i = 1, 2, \dots, N + 1$, 且 $A(i)$ 为常数。从式(8)可以得知, 一个含有 N 条极化支路的等效电路, 其对应的回复电压曲线公式中含有 $N + 1$ 个子曲线 ($A(i)e^{-p_i t}$) 叠加而成。由于各极点 p_i 都是负数, 为了使回复电压表达式更能形象的表现出其先增大后减小的变化趋势, 对 p_i 取反, 则 $p_i > 0$, 式(8)变为:

$$U_r(t, t_c, t_d) = \sum_{i=1}^{N+1} A(i) e^{-p_i t} \quad (9)$$

2 回复电压微分解谱法

为了达到确定弛豫响应等效电路中极化支路数 N 的目的, 对回复电压表达式(9)进行一次微分并乘以对应测量时间的相反数得到回复电压时域微分谱线为:

$$-t \frac{dU_r}{dt} = \sum_{i=1}^{N+1} A(i) \cdot p_i t \cdot \exp(-p_i t) \quad (10)$$

式中: $\phi_i(t) = p_i t \cdot \exp(-p_i t)$ 是一个微分线型函数, 图像如图3所示。

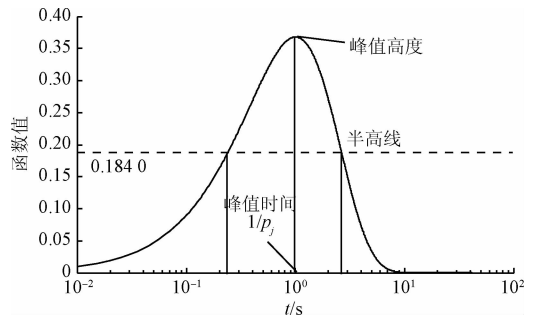


图3 微分线型函数谱线图

Fig.3 Line graph of differential linear function

从图3可知, 当且仅当 $t = 1/p_i$ 时, 微分线型函数谱线具有唯一峰值点 $1/e$, 并从峰值点开始向两边迅速衰减直至趋近于0。因此回复电压时域微分谱线可以看成是由 $N + 1$ 条具有单一峰值且峰值位置不同的微分线型函数谱线线性叠加而来。且当 $p_i (j = 1, 2, \dots, N + 1)$ 的值越大时, 则对应的微分线型函数 $\phi_i(t)$ 衰减的越快, 反之函数 $\phi_i(t)$ 衰减的越慢。所以 p_i 越大的子谱线对回复电压时域微分谱线的末端贡献值就越小, 且对 p_i 小的子谱线末端的影响可以忽略不计。

为了更清晰地表达微分线型函数 $\phi_i(t)$ 的3个特性, 下面对两个 p_i 差3倍的微分线型谱线 $f_1 = 0.1te^{-0.1t}$ 和 $f_2 = 0.1te^{-0.3t}$ 进行对比, 两函数谱线对比关系如图4所示。

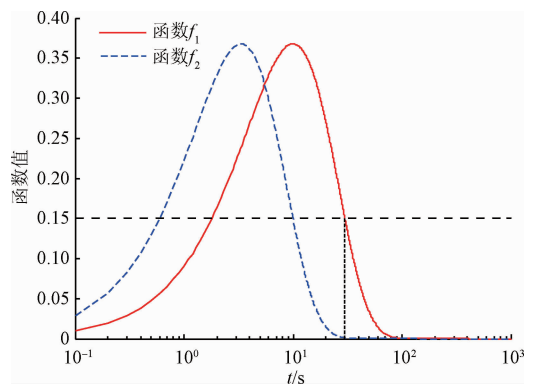


图4 谱线对比情况

Fig.4 Comparison of spectral line

由图4可知, 当谱线 $f_1 = 0.1te^{-0.1t}$ 处于 0.1504 时的 $t = 30$ 。而此时的 t 对应的谱线 $f_2(30) = 9e^{-9} = 0.73\% \cdot f_1(30)$ 。由此可见, 两微分线型谱线的叠加, 可以近似的认为, p_i 值大的微分线型谱线对两微分线型谱线的叠加谱线末端几乎没有影响。若相邻两子谱线的 p_i 值差距进一步拉大, 则这一特性将更加明显。

因此, 根据回复电压表达式(9)和回复电压微分解

谱法原理, 本文提出油纸绝缘变压器等效电路极化支路数的判定准则:

若运用回复电压微分解谱法分解出变压器回复电压时域微分谱线中含有 m 条子谱线, 则变压器绝缘系统等效电路中的极化支路数 $N = m - 1$ 。

3 回复电压微分解谱法步骤

基于以上理论提出的判定油纸绝缘变压器等效电路支路数的新技术方法的具体操作步骤如下:

1) 将测试获取的回复电压曲线 $U_r(t)$ 转换为回复电压时域微分谱线 $U_d = -t \frac{dU_r}{dt}$ 。

2) 由于后一项子谱线对前一项子谱线 (p_i 值小的为前一项谱线, p_i 值大的为后一项谱线) 末端的影响可以忽略。所以从当前回复电压时域微分谱线最末端开始, 任意取两个点 $(t_1, U_d(t_1))$, $(t_2, U_d(t_2))$, 它们满足:

$$\begin{cases} U_d(t_1) - A(1) \cdot p_1 t_1 \cdot \exp(-p_1 t_1) = 0 \\ U_d(t_2) - A(1) \cdot p_1 t_2 \cdot \exp(-p_1 t_2) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

联立式 (11) 即可以求解出第 1 条子谱线 U_{d1} 参数 $[A(1), p_1]$ 。

3) 将回复电压时域微分谱线 U_d 减去求出的第一条子谱线 U_{d1} 得到剩余谱线 U_{d10} , 在剩余谱线 U_{d10} 末端任意取两点 $(t_3, U_{d10}(t_3))$, $(t_4, U_{d10}(t_4))$, 它们满足:

$$\begin{cases} U_{d10}(t_3) - A(2) \cdot p_2 t_3 \cdot \exp(-p_2 t_3) = 0 \\ U_{d10}(t_4) - A(2) \cdot p_2 t_4 \cdot \exp(-p_2 t_4) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

联立式 (12) 即可以求解出第 2 条子谱线 U_{d2} 参数 $[A(2), p_2]$ 。

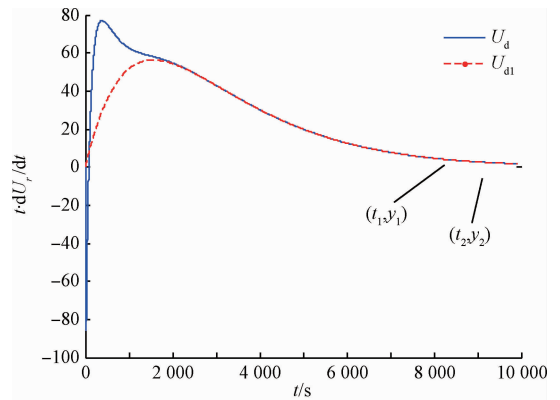
4) 以此类推, 用相同的解谱方法对剩余谱线进行解谱, 求出剩余子谱线的参数 $[A(i), p_i]$ ($i = 3, 4 \dots, N + 1$)。

5) 当满足某次剩余谱线峰值小于预设的阈值时 (当剩余谱线峰值小于 U_d 最大值的 5% 时, 即可认为剩余谱线对 U_d 贡献值可忽略不计), 则终止解谱。

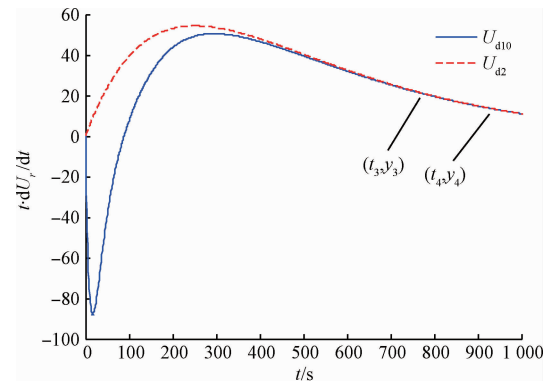
6) 根据步骤 5) 中最后得到的子谱线个数 m , 并依据变压器等效电路极化支路数的判定准则判定出其极化支路数 N 。

4 实例验证分析

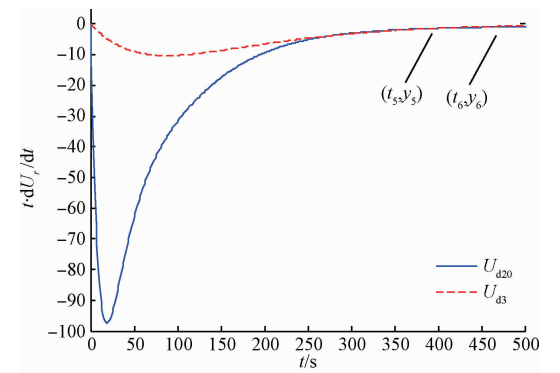
根据以上提出的油纸绝缘变压器等效电路极化支路数的判定准则, 现对一台绝缘老化较严重的变压器 T_1 进行回复电压测试, 在获得其的回复电压曲线基础上, 利用本文提到的回复电压微分解谱法对其进行解谱, 来研究其等效电路, 其解谱过程如图 5 所。



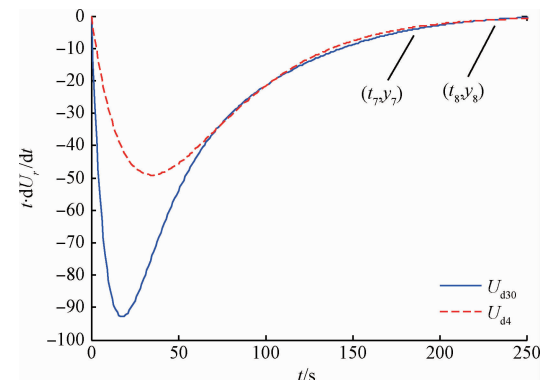
(a) 第 1 条子谱线
(a) First sub spectral line



(b) 第 2 条子谱线
(b) Second sub spectral line



(c) 第 3 条子谱线
(c) Third sub spectral line



(d) 第 4 条子谱线
(d) Fourth sub spectral line

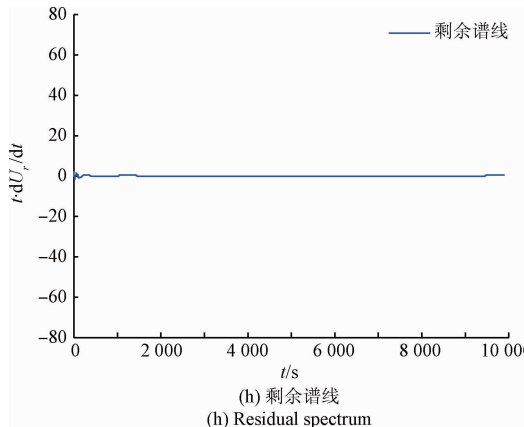
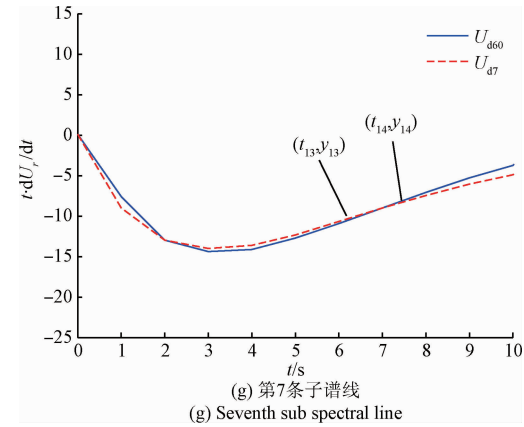
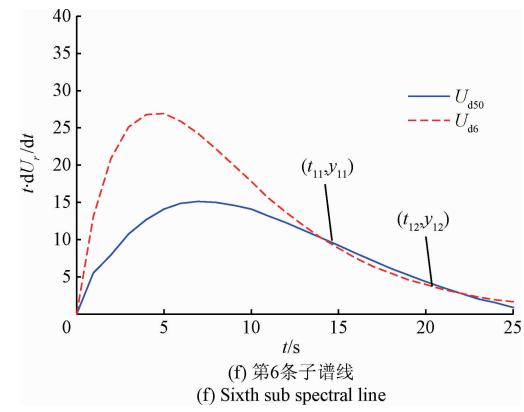
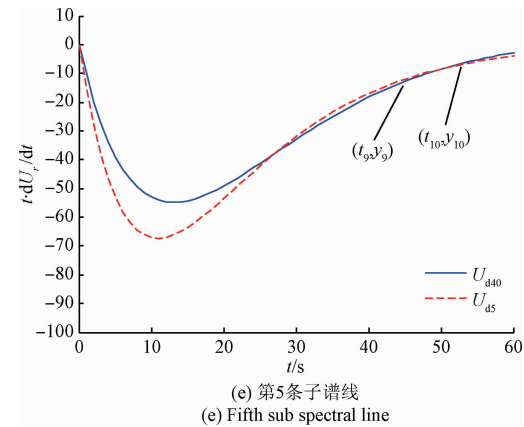


图5 解谱过程

Fig. 5 Solution spectrum process

从图5的解谱过程可知,每条子谱线均能准确地从对应的剩余谱线中分解出来,最终分解出7条子谱线,根据上文的判定准则,可知变压器 T_1 的等效电路的极化支路数为6。为验证变压器 T_1 含有6条极化支路的等效电路最能准确的反映其油纸绝缘老化状态,现利用等效电路参数辨识方法对变压器 T_1 分别采用5、6、7条极化支路进行等效电路参数辨识^[13-16],辨识结果如表1所示。再利用等效电路参数求解各自对应的回复电压极化谱,并将其与实测回复电压极化谱作对比,对比结果如图6所示。

表1 变压器 T_1 等效电路参数

Table 1 Equivalent circuit parameters of transformer T_1

极化支路	$R_{pi}/G\Omega$	C_{pi}/nF	$R_{pi}/G\Omega$	C_{pi}/nF	$R_{pi}/G\Omega$	C_{pi}/nF
1	7.27	78.84	7.38	80.95	7.12	77.86
2	3.72	30.64	3.91	31.83	4.02	32.73
3	3.15	6.37	3.25	6.58	3.15	6.45
4	2.86	1.21	2.78	1.01	2.54	1.32
5	0.87	0.66	0.89	0.59	3.89	5.89
6	-	-	0.42	0.27	0.85	0.55
7	-	-	-	-	0.32	0.37
$R_g/G\Omega$	8.32		8.02		7.91	
C_g/nF	25.41		21.36		22.16	

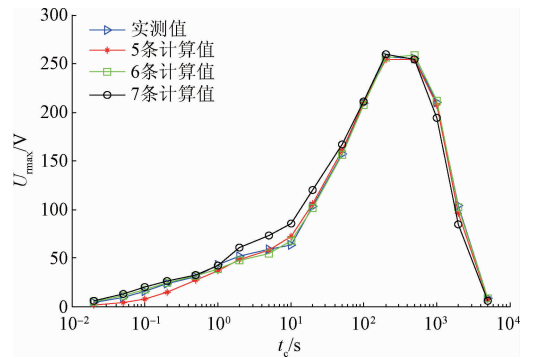


图6 变压器 T_1 回复电压极化谱比较

Fig. 6 Comparison of polarization spectrum of recovery voltage of transformer T_1

从图6中可知,变压器 T_1 含有6条极化支路的等效电路求解获得的回复电压极化谱与测量获得的回复电压极化谱吻合最好。为了更直观地比较3种等效电路求解获得的回复电压极化谱与测量获得的回复电压极化谱之间的吻合程度,利用如式(13)所示的吻合度函数,求出各自的吻合度,求解得知变压器 T_1 采用5、6、7条极化支路的等效电路求解出来的回复电压极化谱与实际测量的回复电压极化谱吻合度分别为82.68%、93.57%、

82.32%。由此可见,变压器 T₁ 采用 6 条极化支路的等效电路最能准确反映变压器油纸绝缘老化情况。

$$P(X) = \left(1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|U_{rmax}(i) - V_{rmax}(i)|}{U_{rmax}(i)} \right) \times 100\% \quad (13)$$

式中: V_{rmax} 为回复电压最大值的计算值, U_{rmax} 为回复电压最大值的测量值。同理,对绝缘良好的变压器 T₂、绝缘较差的变压器 T₃、绝缘老化较严重的变压器 T₄ 进行等效电路分析,求得 3 台的等效电路支路数分别为 4、4、5。为进一步验证文中提出的变压器等效电路极化支路数判定方法的可靠性,对 3 台的等效电路支路数进行分析,结果如表 2 所示。

表 2 三台变压器不同支路数的吻合度

Table 2 Anastomosis degree of different branch number of three transformers

支路数	吻合度/%		
	变压器 T ₂	变压器 T ₃	变压器 T ₄
4	94.99	92.77	98.41
5	57.75	69.19	83.69
6	66.04	67.79	63.97

由表 2 可知,变压器 T₂、T₃、T₄ 吻合度最好的分别是支路数为 4、4、5,这与利用回复电压微分解谱法得出的结果是一致的。所以利用回复电压微分解谱法构建的变压器油纸绝缘等效电路能更准确反映变压器绝缘介质的极化特性和老化情况,而且变压器绝缘老化越严重,则其回复电压微分谱线子谱线个数越多,等效电路的极化支路数越多。这是由于绝缘老化越严重,老化产物随之增多,绝缘介质的极化特性也越复杂。

5 结 论

随着变压器老化的加剧,其绝缘介质的极化特性也会发生相应的变化,而变压器绝缘系统等效电路是反映不同绝缘介质的极化特性的重要途径。所以构建真实反映变压器绝缘介质极化特性的等效电路对准确诊断变压器绝缘老化情况至关重要。通过以上分析可知,利用回复电压微分解谱法能够准确地对变压器油纸绝缘等效电路的极化支路数进行判定,解决了等效电路领域中极化支路数难以确定的问题,从而为构建真实反映变压器老化情况的等效电路奠定重要基础,进一步提高诊断变压器油纸绝缘老化情况的可靠性。

参考文献

[1] 杨丽君,廖瑞金,孙会刚,等. 变压器油纸绝缘热老化特性及特征量研究 [J]. 电工技术学报, 2009,

24(8): 27-33.

YANG L J, LIAO R J, SUN H G, et al. Investigation on properties and characteristics of oil-paper insulation in transformer during thermal degradation process [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 27-33.

[2] 蔡金锭,林智勇,蔡嘉. 基于等效电路参数的变压器油中糠醛含量判别法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 706-713.

CAI J D, LIN ZH Y, CAI J. Study on the discrimination method of furfural content in transformer oil based on equivalent circuit parameters [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(3): 706-713.

[3] 林智勇,蔡金锭. 变压器等效电路参数变化对极化谱的影响分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(3): 292-298.

LIN ZH Y, CAI J D. Analysis for influence of transformer equivalent circuit parameters change on polarization spectrum [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(3): 292-298.

[4] 马志钦,廖瑞金,郝建,等. 温度对油纸绝缘极化去极化电流的影响[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 290-297.

MA ZH Q, LIAO R J, HAO J, et al. Influence of temperature on polarization and depolarization current of oil-paper insulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 290-297.

[5] 赵婉芳,王慧芳,邱剑,等. 基于油色谱监测数据的变压器动态可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 38-42, 49.

ZHAO W F, WANG H F, QIU J, et al. Analysis of dynamic reliability of transformer based on monitoring data of oil chromatography [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 38-42, 49.

[6] SAHA T K, PURKAIT P, MTILLER F. Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, (01): 149-157.

[7] 周天春,杨丽君,廖瑞金,等. 基于局部放电因子向量和 BP 神经网络的油纸绝缘老化状况诊断[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 18-23.

ZHOU T CH, YANG L J, LIAO R J, et al. Diagnosis of aging condition in oil-paper insulation based on factor vectors of partial discharge and BP neural network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 18-23.

[8] YU X ZH, BIRLASEKARAN S. Study of recovery voltage

- mechanism[C]. International Conference on Properties & Applications of Dielectric Materials, 2000:935-938.
- [9] XU SH ZH, MIDDLETON R, FETHERTON F, et al. A comparison of Return voltage measurement and frequency domain spectroscopy test on high voltage Insulation[C]. Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003: 351-355.
- [10] SAMARASINGHE W, KUMARA J, FERNANDO M, et al. Aging assesment of transformer pressboard insulation by micro-strip ring resonator at GHz frequencies[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1923-1930.
- [11] GARCIA B, GARCIA T, PRIMO V, et al. Studying the loss of life of natural-ester-filled transformer insulation: impact of moisture on the aging rate of paper[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2017, 33(1): 15-23.
- [12] TANG C, ZHANG S, LI X, et al. Experimental analyses and molecular simulation of the thermal aging of transformer insulation paper[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6): 3608-3616.
- [13] 江修波, 黄彦婕, 赖祥生. 改进蚁群算法及其在变压器绝缘介质响应电路参数辨识中的应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1982-1988.
JIANG X B, HUANG Y J, LAI X SH. Improved ant colony algorithm and its application in parameter identification for dielectric response equivalent circuit of transformer [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1982-1988.
- [14] 林智勇, 蔡金锭. 基于回复电压特征量的油纸绝缘老化诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(11): 1669-1676.
LIN ZH Y, CAI J D. Aging diagnosis of oil-paper insulation based on the return voltage characteristics[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(11): 1669-1676.
- [15] 彭积城, 蔡金锭. 油纸绝缘变压器老化特征分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(7): 763-769.
PENG J CH, CAI J D. Analysis on aging characteristics of oil-paper insulated transformer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(7): 763-769.
- [16] 邹阳, 蔡金锭. 变压器极化谱特征量与绝缘状态关系研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 608-614.
ZOU Y, CAI J D. Study on the relationship between polarization spectrum characteristic quantity and insulation condition of oil-paper transformer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 608-614.

作者简介



林智勇 (通讯作者), 分别在 2010 年和 2016 年于福州大学获得学士学位和博士学位, 现为厦门理工学院讲师, 主要研究方向为电气设备绝缘监测与故障诊断。E-mail: 625720199@qq.com

Lin Zhiyong (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Fuzhou University in 2010 and 2016, respectively. Now he is a lecturer in Xiamen University of Technology. His main research interests include insulation monitoring and fault diagnosis of electrical equipment.



张达敏, 2006 年于华侨大学获得学士学位, 2009 年于厦门大学获得硕士学位, 2013 年于浙江大学获得博士学位, 现为厦门理工学院副教授, 主要研究方向为新能源发电技术。

E-mail: hqxzmj@sina.com

Zhang Damin received his B. Sc. degree from Huaqiao University in 2006, and his M. Sc. degree from Xiamen University in 2009 and his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2013. Now he is an associate professor in Xiamen University of Technology. His main research interest is new energy power generation technology.